

Παραγωγή ανθεκτικών σκυροδεμάτων με χρήση αδρανών σκωρίας κάδου

Κοσμάς Κ. Σίδερης

Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ., kksider@civil.duth.gr

Αλέξανδρος Χατζόπουλος

Πολ. Μηχανικός, υπ. Διδάκτορας Δ.Π.Θ., achatzop@civil.duth.gr

Χρήστος Τάσσος

Πολ. Μηχανικός, υπ. Διδάκτορας Δ.Π.Θ., ctassos@civil.duth.gr

1. Εισαγωγή

Το συμβατικό σκυρόδεμα αποτελεί, ως γνωστόν, το πλέον διαδεδομένο υλικό κατασκευής φέροντα οργανισμού εδώ και πολλές δεκαετίες. Μας έχει αποφέρει πολλά πλεονεκτήματα και οφέλη καθ' όλα τα χρόνια χρήσης του. Παρ' όλα αυτά πάντα υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης σε διάφορα επίπεδα με ένα από αυτά να είναι η φιλικότητα του συμβατικού σκυροδέματος προς το περιβάλλον (Manso et al 2004). Προς αυτή την κατεύθυνση είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή του σκυροδέματος υλικά που μέχρι πρότινος έμεναν αχρησιμοποίητα ή και ρύπαιναν το περιβάλλον με την εναπόθεσή τους σε αυτό. Παράλληλα η χρήση κάποιων υλικών ενδεχομένως να βελτιώνουν και τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος (Anastasiou, 2009).

Λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των υλικών (Pellegrino et al, 2008, Polanco et al, 2011), στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε αντικατάσταση μέρους της ασβεστολιθικής άμμου με άμμο σκωρίας κάδου σε διάφορα ποσοστά ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των μειγμάτων στις δοκιμές αντοχής και ανθεκτικότητας που πραγματοποιήθηκαν (Maslehuddin et al, 2003, Aribas et al, 2014). Η σκωρία κάδου είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας χάλυβα που προκύπτει κατά το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας του ακατέργαστου υλικού και παρουσιάζει τσιμεντοειδείς ιδιότητες, κυρίως λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε CaO (Parayianni et al, 2003).

2. Πειραματικό πρόγραμμα

Δέκα διαφορετικά μείγματα συμβατικού σκυροδέματος παρήχθησαν. Τα μείγματα ανήκαν στις κατηγορίες αντοχής C25/30 και C30/37, σύμφωνα με το Πρότυπο EN206-1 (2000). Όλα τα μείγματα παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τσιμέντα τύπου CEM II A-M / 32.5N και CEM II A-M/42.5N. Τα μείγματα παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε νωπή κατάσταση. Τα χονδρόκοκκα αδρανή αποτελούνταν από θρυμματισμένο γρανίτη με μέγιστο μέγεθος 32mm. Τα λεπτόκοκκα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θραυστή ασβεστολιθική άμμος. Η άμμος σκωρίας κάδου χρησιμοποιήθηκε ως ένα εναλλακτικό υλικό αντικατάστασης της θραυστής ασβεστολιθικής άμμου σε τέσσερα μείγματα για κάθε κατηγορία αντοχής σε ποσοστά 10%, 20%, 30% και 50% κατ' όγκο της άμμου. Υψηλού εύρους, μείωσης νερού, καρβοξυλικού αιθέρα, πολυμερές πρόσμικτο προστέθηκε σε διαφορετικές δοσολογίες, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα. Η χημική ανάλυση των τσιμέντων και της ΣΗΚ που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χημική ανάλυση των υλικών

	CEM II 32,5	CEM II 42,5	Άμμος ΣΚ
SiO ₂	28	23,85	6,53
Al ₂ O ₃	9	5,22	2,33
Fe ₂ O ₃	5,5	4,13	8,69
CaO	48	58,2	30,85
MgO	2,2	3,2	4,52
SO ₃	3,2	3,3	-
K ₂ O	1,5	0,68	-
Na ₂ O	0,5	0,32	0,13
TiO ₂	-	0,24	0,14
P ₂ O ₅	-	0,06	-
SrO	-	0,03	-
Cr ₂ O ₃	-	0,02	0,13
ZnO	-	0,01	0,17
MnO	-	-	1,06
ειδικό βάρος	3,15	3,1	2,59

Χρησιμοποιήθηκε γαρμπίλι (2-16 mm) και σκύρα (8-32 mm) τα οποία προήλθαν από θραύση φυσικού πετρώματος σε σπαστήρα. Σε ορισμένα μείγματα η ασβεστολιθική άμμος αντικαταστάθηκε από άμμο σκωρίας κάδου.

Οι αναλογίες καθώς και οι ιδιότητες των νωπών μειγμάτων παρουσιάζονται για όλα τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν στους Πίνακες 2 και 3.

Πίνακας 2: Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

Μελέτη Σύνθεσης	C 25/30	C 25/30 10%	C 25/30 20%	C 25/30 30%	C 25/30 50%
kg/m ³	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
Τσιμέντο II 32,5	300	300	300	300	300
Τσιμέντο II 42,5	50	50	50	50	50
Γαρμπίλι	270	270	270	270	270
Σκύρα	630	630	630	630	630
Ασβεστολιθική άμμος	900	810	720	630	450
Άμμος Σκωρίας	0,0	107,9	215,7	323,6	539,3
Νερό	180	180	180	180	180
Υπερ/της	1,42	2,08	2,25	3,00	4,67
N/T	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Κάθιση (mm)	20	19	18,5	19	19
Αέρας (%)	2,50	2,30	2,50	2,40	2,50

Πίνακας 3: Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

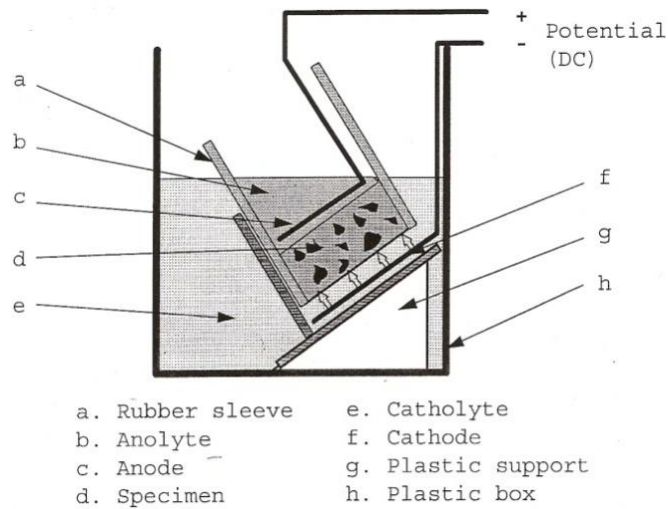
Μελέτη Σύνθεσης	C 30/37	C 30/37 10%	C 30/37 20%	C 30/37 30%	C 30/37 50%
kg/m ³	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
Τσιμέντο ΙΙ 32,5	150	150	150	150	150
Τσιμέντο ΙΙ 42,5	200	200	200	200	200
Γαρμπίλι	270	270	270	270	270
Σκύρα	630	630	630	630	630
Ασβεστολιθική άμμος	900	810	720	630	450
Άμμος Σκωρίας	0,0	107,9	215,7	323,6	539,3
Νερό	180	180	180	180	180
Υπερ/της	1,67	2,17	2,17	2,83	4,33
N/T	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Κάθιση (mm)	19	18,5	18,5	19,5	17,5
Αέρας (%)	2,20	2,30	2,40	2,10	2,00

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν τις δοκιμές ήταν κύβοι ακμής 150mm, κύβοι ακμής 100mm και κύλινδροι 60x100mm, 100x200mm και 150x300mm. Όλα τα δείγματα συντηρήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης (T=20°C, RH>98%) μέχρι την ηλικία των δοκιμών. Παρασκευάστηκαν επίσης κυλινδρικά δοκίμια 60X100mm τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης.

Τα δοκίμια αυτά συντηρήθηκαν στον ως άνω υγρό θάλαμο για 3 ημέρες ενώ στη συνέχεια συντηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Μετά την ηλικία αυτή εισήχθησαν στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης.

Οι κύβοι των 150mm χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής σε διαφορετικές ηλικίες και για τον προσδιορισμό της υδατοαπορροφητικότητας. Οι κύβοι των 100mm χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή της ψύξης-απόψυξης. Αφού κόπηκαν στη μέση, τοποθετήθηκαν σε διάλυμα 3% NaCl και υποβλήθηκαν σε 15 εικοσιτετράωρους κύκλους ψύξης-απόψυξης (-14°C και +20°C). Η αντίσταση σε ενανθράκωση μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια 60x100mm. Αυτοί οι μικροί κύλινδροι αρχικά συντηρήθηκαν επί 3 ημέρες στο προαναφερόμενο θάλαμο συντήρησης. Από αυτή την ηλικία και μετά τοποθετήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου (σχετική υγρασία=50-60% και θερμοκρασία=20±2°C). Στην ηλικία των 28 ημερών μεταφέρθηκαν στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (T=20°C, σχετική υγρασία=55%, CO₂=1%). Τα δοκίμια παρέμειναν σε αυτόν τον θάλαμο για 60 ημέρες.

Η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων των σκυροδεμάτων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 100mm και ύψος 50mm που σχηματίζονται από τους κύλινδρους 100x200mm. Τα δοκίμια αυτά συντηρήθηκαν όπως παραπάνω μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Ακολούθως εκτιμήθηκε ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων De σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο NT Build 492 (Σχήμα 1). Τέλος, οι κύλινδροι διαστάσεων 150x300mm χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή εφελκυσμού διάρρηξης.



Σχήμα 1: Συσκευή δοκιμής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων D_c . (NT Build 492, 1999).

3. Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση

3.1 Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7, 28 και 90 ημερών. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στους Πίνακες 4 και 5.

Πίνακας 4: Αντοχή σε θλίψη των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30 (MPa)

(Mpa)	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
f_{c_2}	25,2	24,4	24,7	24,5	24,4
f_{c_7}	30,1	34,5	33,9	34,5	34,4
$f_{c_{28}}$	39,1	47,7	50,6	52,1	51,8
$f_{c_{90}}$	44,6	55,7	56,9	57,2	57,5

Πίνακας 5: Αντοχή σε θλίψη των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37 (MPa)

(Mpa)	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
f_{c_2}	28,7	28,8	29,3	31,9	32,5
f_{c_7}	30,2	37,0	37,5	40,3	41,8
$f_{c_{28}}$	46,4	51,6	52,1	56,8	59,5
$f_{c_{90}}$	50,3	56,5	56,7	60,3	63,3

Από τις τιμές των ανωτέρω πινάκων φαίνεται ότι με τη χρήση της ΣΚ ως λεπτόκοκκο αδρανές η θλιπτική αντοχή των 2 ημερών είναι σταθερή, ανεξαρτήτως του ποσοστού που αυτή θα αντικαταστήσει την ασβεστολιθική άμμο. Η κατάσταση όμως φαίνεται να αλλάζει σε μεθύτερες ηλικίες. Έτσι στην ηλικία των 28 ημερών όλα τα μείγματα στα οποία η ΣΚ έχει χρησιμοποιηθεί ως μερική αντικατάσταση της ασβεστολιθικής παρουσιάζουν υψηλότερες αντοχές από τα σκυροδέματα

αναφοράς σε ποσοστά που φτάνουν έως και 33,2% (M4-30). Μάλιστα φαίνεται ότι και στις δύο κατηγορίες αντοχών όσο μεγαλύτερη είναι η αντικατάσταση της ασβεστολιθικής άμμο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντοχή του σκυροδέματος. Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής συνεχίζεται και στην ηλικία των 90 ημερών για όλα τα μείγματα.

3.2 Εφελκυσμός διάρρηξης

Η αντοχή σε εφελκυσμό διάρρηξης (ASTM C496 / C496M-11, 2004) μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 28 και 90 ημερών. Οι τιμές παρουσιάζονται στους πίνακες 6 και 7.

Πίνακας 6: Αντοχή σε εφελκυσμό διάρρηξης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30 (MPa)

(MPa)	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
f_{c28}	3,2	3,6	3,6	3,5	3,6
f_{c90}	3,3	3,8	3,7	3,7	3,7

Πίνακας 7: Αντοχή σε εφελκυσμό διάρρηξης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37 (MPa)

(MPa)	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
f_{c28}	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6
f_{c90}	3,6	3,7	3,7	3,7	3,8

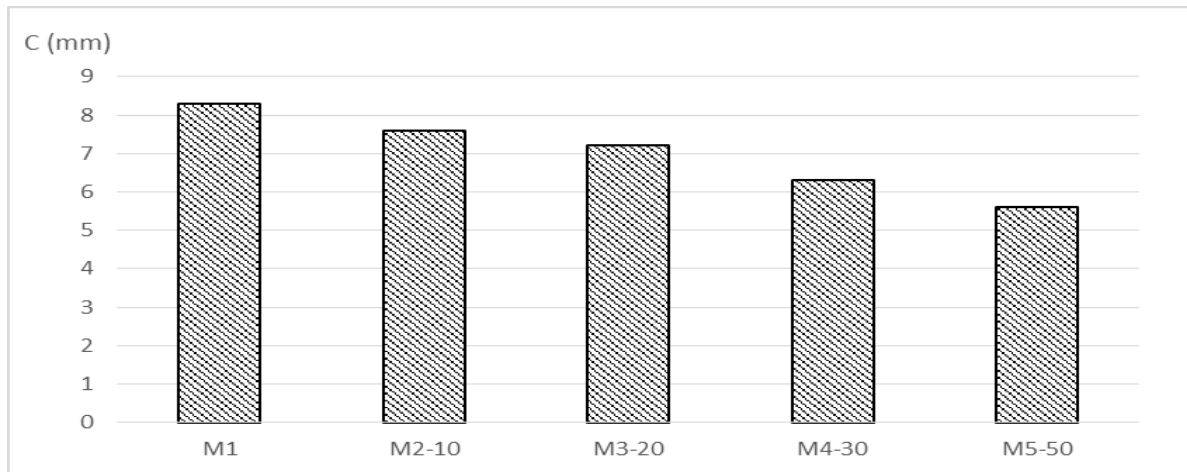
Όπως γνωρίζουμε το σκυρόδεμα δεν έχει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό. Αυτό επιβεβαιώθηκε και στην παρούσα εργασία, αφού οι αντοχές εφελκυσμού είναι περίπου 15 φορές μικρότερη από την θλιπτική. Μεταξύ των μειγμάτων δεν υπάρχει σημαντική αλλαγή της αντοχής, οπότε, ότι στην συγκεκριμένη μηχανική ιδιότητα, η χρήση ΣΚ δεν αποφέρει καμία αλλαγή στο σκυρόδεμα.

3.3 Βάθος Ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε με ψεκάσμο των φρεσκοθραυσμένων επιφανειών των δοκιμίων, με δείκτη φαινολοφθαλείνης, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Πρότυπο EN 14630. Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στους Πίνακες 8 και 9 και παρίσταται γραφικώς στα Σχήματα 2 και 3.

Πίνακας 8: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

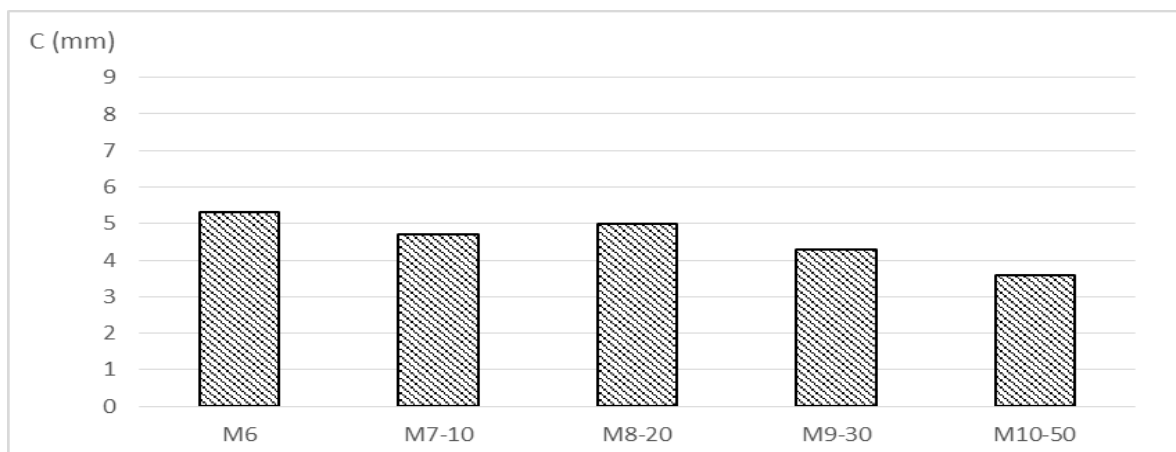
Ενανθράκωση (mm)	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
Επιταχυνόμενη	8,3	7,6	7,2	6,3	5,6



Σχήμα 2: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

Πίνακας 9: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

Ενανθράκωση (mm)	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
Επιταχυνόμενη	5,3	4,7	5	4,3	3,6



Σχήμα 3: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

Στα Σχήματα αυτά αποτυπώνεται η θετική επίδραση που προσδίδει η αντικατάσταση της ασβεστολιθικής άμμου από άμμο ΣΚ στα μείγματα. Το βάθος ενανθράκωσης όλων των σκυροδεμάτων μειώνεται σημαντικά και μάλιστα στα μείγματα με 50% αντικατάσταση της άμμου, η μείωση ξεπερνά το 32%.

3.4 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων

Οι τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων D_c που μετρήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στους Πίνακες 10 και 11.

Πίνακας 10: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	14,3	12,78	12,83	10,89	11,19

Πίνακας 11: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	12,5	11,91	11,4	8,93	7,34

Ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων μειώνεται σε όλα τα μείγματα που παρασκευάστηκαν με χρήση αδρανών ΣΚ. Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη στα μείγματα κατηγορίας αντοχής C25/30. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι στα μείγματα M4-30 και M5-50 ο συντελεστής De μετρήθηκε χαμηλότερος από την τιμή του σκυροδέματος M6 το οποίο ανήκει στη μεγαλύτερη κατηγορία αντοχής.

3.5 Ψύξη-Απόψυξη

Η απώλεια βάρους των δοκιμίων μετά από 15 ημερήσιους κύκλους ψύξης-απόψυξης (EN 12390-9, 2006) για όλα τα μείγματα παρουσιάζονται στους πίνακες 12 και 13.

Πίνακας 12: Ποσοστιαία απώλεια βάρους των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
% Απώλεια βάρους	28,0%	21,4%	20,3%	20,7%	18,6%

Πίνακας 13: Ποσοστιαία απώλεια βάρους των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
% Απώλεια βάρους	18,0%	15,0%	14,8%	12,2%	11,4%

Η χρήση άμμου ΣΚ επηρέασε σημαντικά την αντίσταση σε ψύξη-απόψυξη των μειγμάτων των δύο κατηγοριών αντοχής. Για παράδειγμα, το M10-50 παρουσίασε μείωση της απώλειας μάζας σε ποσοστό άνω του 40% σε σχέση με το μείγμα αναφοράς. Και σε αυτή τη δοκιμή η αντικατάσταση της άμμου επέφερε αύξηση στην αντοχή έναντι κύκλων ψύξης-απόψυξης για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης. Μάλιστα απώλειας μάζας φαίνεται να μειώνεται περισσότερο όσο αυξάνεται η χρήση της άμμου ΣΚ.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η διάβρωση των δοκιμίων M6 και M10-50 μετά από 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης.



Εικόνα 1: Απώλεια μάζας δοκιμίου C30/37 (αριστερά) και C30/37 με 50% αντικατάσταση της άμμου (δεξιά) μετά από 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης

3.6 Υδατοαπορροφητικότητα

Οι μετρήσεις υδατοαπορροφητικότητας πραγματοποιήθηκαν στην ηλικία των 28 ημερών σε δοκίμια ακμής 150mm. Τα δοκίμια παρέμειναν στο θάλαμο συντήρησης του εργαστηρίου μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Στη συνέχεια, ξηράνθηκαν στους 65 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους. Κατόπιν, τα δοκίμια προετοιμάστηκαν κατάλληλα (τυλίχθηκαν με μονωτική ταινία περιμετρικά για την εξασφάλιση της απορρόφησης μόνο από τη βάση του δοκιμίου) και αφού ζυγίστηκαν, τοποθετήθηκαν σε λεκάνες με καθαρό νερό κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η το νερό να καλύπτει 3-5 mm του ύψους του δοκιμίου.

Μετρήσεις μεταβολής του βάρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν στις χρονικές στιγμές των 10 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min, 240 min, 480 min και 24hr. Τα βάρη αυτά διαιρέθηκαν με την εκτεθειμένη επιφάνεια του δοκιμίου στο νερό (0,0225 m²) για να υπολογιστεί η υδατοαπορροφητικότητα σε μονάδες gr/m².

Πίνακας 14: Υδατοαπορροφητικότητα μειγμάτων C25/30

	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
gr/m ³	4777,8	4933,3	4800,0	4355,6	4444,4
gr	107,5	111	108	98	100

Πίνακας 15: Υδατοαπορροφητικότητα μειγμάτων C30/37

	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
gr/m ³	3777,8	3755,6	3777,8	3711,1	3466,7
gr	85	84,5	85	83,5	78

Η χρήση άμμου ΣΚ σε μικρά ποσοστά δεν επηρέασε ουσιαστικά την αντίσταση των μειγμάτων έναντι υδατοαπορροφητικότητας. Τα μείγματα που παρουσίασαν μικρή βελτίωση, λιγότερο από 10%, ήταν το M4-30, M5-50 και M10-50 είναι αυτά με την μεγαλύτερη αντικατάσταση άμμου.

4. Συμπεράσματα

Η χρήση άμμου σκωρίας κάδου ως μερική αντικατάσταση της συμβατικής άμμου για την παραγωγή σκυροδεμάτων C25/30 και C30/37 δεν επηρεάζει αρνητικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τους δείκτες ανθεκτικότητας των μειγμάτων που μετρήθηκαν στην παρούσα έρευνα. Αντιθέτως η θλιπτική αντοχή των σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με προσθήκη σκωρίας κάδου παρουσίασε σημαντική αύξηση μετά την ηλικία των 7 ημερών, ενώ η αντίσταση έναντι ενανθράκωσης, διείσδυσης χλωριόντων και έναντι παγετού υπήρξε αξιοσημείωτη. Φαίνεται λοιπόν ότι η μερική αντικατάσταση συμβατικής άμμου από άμμο σκωρίας κάδου οδηγεί στην Παρασκευή ανθεκτικών και φιλικών προς το περιβάλλον σκυροδεμάτων, συμβάλλοντας κατ' αυτό τον τρόπο στην αειφορία των κατασκευών.

Βιβλιογραφία

- Anastasiou E (2009) Utilization of steel slags and lignite fly ashes in the production of concrete for special applications. PhD thesis: Department of Civil Engineering, AUTH.
- Arribas I, Vegas I, San-Jose JT, Manso JM (2014) Durability studies on steelmaking concretes. *Materials and Design* 63: 168-176.
- ASTM C496 / C496M-11, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- EN 12390-9: Testing hardened concrete. Freeze-thaw resistance. Scaling, BSI, page 28, 2006.
- EN 206-1 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity, 2000.
- Manso JM, González JJ, Polanco JA (2004) Electric Arc Furnace in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 16: 639-645.
- Maslehuddin M, Sharif AM, Shameem M, Ibrahim M, Barry MS (2003) Comparison of Properties of Steel Slag and Crushed Limestone Aggregate Concretes. *Construction and Building Materials* 17: 105-112.
- NT Build 492 - Concrete Mortar and Cement-based Repair Materials - Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments, 1999
- Papayianni I, Anastasiou E (2003) Concrete incorporating high volumes of industrial by-products. *Proceedings of the International Conference on Celebrating Concrete: People and Practice*: 595-604.
- Pellegrino C, Gaddo V (2009) Mechanical and Durability Characteristics of Concrete Containing EAF Slag as Aggregate. *Cement and Concrete Composites* 31: 663-67.
- Polanco J, Manso JM, Setién J, González JJ (2011) Strength and Durability of Concrete Made with Electric Steelmaking Slag. *ACI Materials Journal* 108: 196-203.